

鉛直アレー記録からみた表層地盤 における地震エネルギーの収支

國生剛治¹・本山隆一²

¹ 正会員 工博 中央大学教授 理工学部土木工学科 (〒112-8551 東京都文京区春日 1-13-27)

² 学生員 中央大学大学院理工学研究科土木工学専攻 (〒112-8551 東京都文京区春日 1-13-27)

表層地盤の主要動による震動応答は、基盤から入射したSH波が表層方向に伝播し、地表で全反射して再び基盤方向に伝播していくという単純なモデルでほぼ説明できることが知られている。波動が伝播していくとき、地盤が破壊したり非線形化するとその部分ではエネルギーが消費される。そのエネルギー消費は入射波と反射波のエネルギーの差として求められると考えられる。本研究では、1995年兵庫県南部地震において鉛直アレーにより観測された加速度時刻歴を、重複反射理論を用いて入射波、反射波に分解し、それらから計算したエネルギーの差から地震の際に地盤内でどの程度のエネルギーが消費されるのかを検討した。

Key Words : Earthquake wave energys, Energy loss, Hyogo-ken Nanbu Earthquake,
Earthquake array observation, SH wave, Surface wave, Multi-reflection theory

1. はじめに

地震波の主要動は、基盤から入射する水平せん断波(SH波)が鉛直方向に伝播するという単純なモデルでかなり説明できる。このとき重複反射理論によって地震波は、まず基盤から入射して表層方向に伝播し、地表で全反射して再び基盤方向に伝播していく。波動が伝播していくとき、地盤が破壊したり非線形化するとその部分で大きなエネルギーが消費されるが、このエネルギー消費量は入射波と反射波から求められるエネルギーの差として求められる。そこで本研究では、兵庫県南部地震の際に鉛直アレーによって観測された加速度記録を重複反射理論によって入射波、反射波に分解し、これらの波動によるエネルギーを計算することにより、その差から地盤内でどの程度のエネルギーが消費されるのかを検討した。これにより表層地盤の震動応答をエネルギー収支から評価することを試みた。

2. 波動によるエネルギーの計算方法

微小要素中を一方向に伝播する波動によるエネルギーは、要素の運動エネルギーとひずみエネルギーの和として考えられる。まず運動エネルギーについて

考えてみると、微小要素(V_s をS波速度とすれば、微小時間 Δt の間にほぼ剛体的に動く地盤の微小要素の厚さは、 $V_s \Delta t$)に働く慣性力 F は地盤の密度を ρ とすると、

$$F = \rho V_s \Delta t \frac{d^2 u}{dt^2}$$

であるが、その微小要素がゼロから u まで変位することによりなされる仕事は運動エネルギーと等しくなる。したがって、単位平面積あたりの運動エネルギー E_k は次式のように表される。

$$E_k = \int_0^u \rho V_s \Delta t \frac{d^2 u}{dt^2} du = \frac{1}{2} \rho V_s \Delta t \left(\frac{du}{dt} \right)^2$$

次にひずみエネルギーについて考える。波動が伝播していくとき地盤にはひずみが生じ、それによりひずみエネルギーが生じる。地盤に働く応力を τ 、ひずみを γ とすると単位平面積あたりの弾性ひずみエネルギー E_e は次式のように表される。

$$E_e = \int_0^\gamma V_s \Delta t \tau d\gamma = \frac{1}{2} \rho V_s \Delta t \left(\frac{du}{dt} \right)^2$$

波動による全エネルギーは運動エネルギー E_k と弾性ひずみエネルギー E_e の和であるから、地震波が微小要素を通過する間($t=t_1 \sim t_2$)の波動による全エネ

ルギーは次式のようにになる。

$$E = \rho V_s \int_{t_1}^{t_2} \left(\frac{du}{dt} \right)^2 dt$$

3. 計算条件

本研究では、地震動の入射波と反射波によるエネルギーを求め、その差をとることで表層付近の地盤内でどの程度エネルギーが消費されたのかを検討する。そのためにまず、鉛直アレーにより観測された加速度時刻歴のうち、地盤物性の非線形性の発揮度合いがそれほど大きくない、地表よりも深い位置で観測された2つの深度の観測波を文献1)の手法にない、重複反射理論を用いて入射波と反射波に分解する。この分解された波を積分して求めた速度時刻歴とエネルギーを算出する式を用いて、2つの深度におけるそれぞれの波動によるエネルギーを計算する。計算に用いた地盤条件は、文献2)に基づいて作成し、S波速度 V_s と減衰 h は本震記録の逆解析による非線形性を考慮した値を用いた。波形データは、兵庫県南部地震の際にポートアイランド、関西電力総合技術研究所構内、海南港変電所において観測された本震記録を地震計の設置誤差を考慮して方向修正し3)、さらにポートアイランドについては、最大加

速度が現れる主軸方向に回転(NS方向から反時計方向に46度回転)させたものを用いた。また、加速度記録を積分して入射、反射速度波を求める際に基線が大きくゆがんでしまうことをさけるため、0.1Hz以下の長周期成分を取り除いて計算した。

4. 各地点におけるエネルギー収支

(1) ポートアイランド

まずはじめにエネルギーを表す際、入射波によるエネルギーを E_I 、反射波によるエネルギーを E_R とし、エネルギー差を E_D ($E_D = E_I - E_R$) で表し、最終的なエネルギーの差、つまりエネルギー消費を E_w で表すことにする。図1、2は上段から0から30秒までについての地表の観測波、エネルギー(GL-32.4mは細線、GL-83.4mは太線、 E_I は点線、 E_D は実線)、2深度の速度の時刻歴をそれぞれ主軸と主軸直角方向について示している。まずエネルギーの時刻歴をみると、 E_w は主軸、主軸直角方向でそれぞれGL-32.4mでは約136 (KJ/m²)、19 (KJ/m²)、GL-83.4mでは約172 (KJ/m²)、26 (KJ/m²) であることが分かる。また、SH波による水平動全体での E_w は主軸と主軸直角方向で計算された E_w の和であるから、GL-32.4mでは155 (KJ/m²)、GL-83.4mでは198

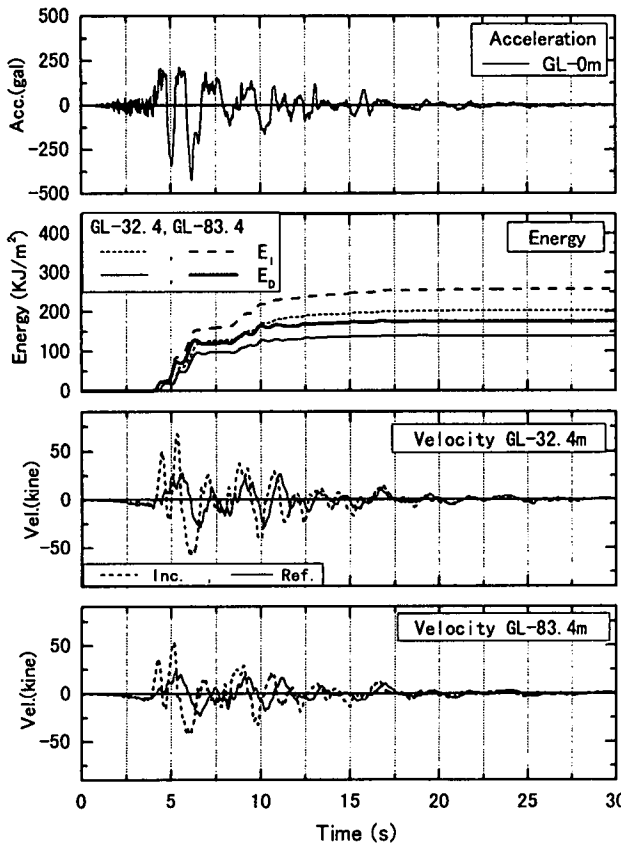


図-1 ポートアイランド 主軸方向の時刻歴

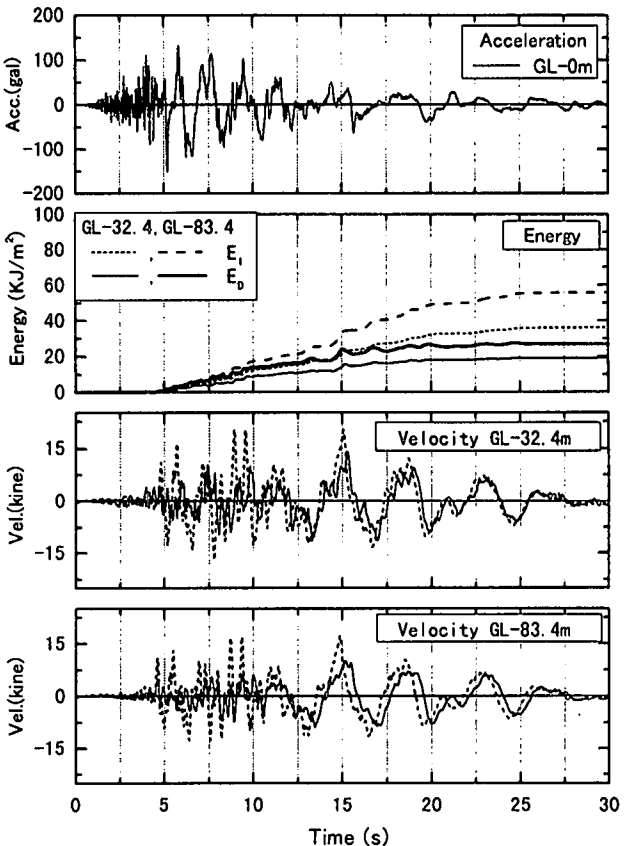


図-2 ポートアイランド 主軸直角方向の時刻歴

(KJ/m^2) のエネルギー消費があったと考えられる。ここで $198 (\text{KJ/m}^2)$ のエネルギーは質量 1t のおもりを 1m^2 あたりに 1 個ずつ 20m の高さから落下させたときのエネルギーに等しい。両者の差 $43 (\text{KJ/m}^2)$ は GL-32.4m から GL-83.4m 間での洪積層の内部減衰により消費されたものであり、この値はあらかじめ与えた地盤物性値に依存している。一方、前者の値は GL-32.4m 以浅の埋土層の液状化や沖積層の内部減衰によるものである。図 1 の主軸方向について地表の観測波とエネルギーの時刻歴を比較すると、4秒～6.3秒の間での E_D の増加率が特に大きくなっており、この短時間に埋土層の液状化が進んだものと推察される。またこれ以降も E_D は 8～10秒でやや増加した後、17秒付近までわずかな勾配で増加しており、17秒以降では E_D の増加率はほとんど 0 になっている。この間、特に図 2 に示す主軸直角方向では、エネルギー消費量が一定であるにもかかわらず E_I が増大してはいるが、これは表面波が卓越してくるためではないかと思われる。

(2) 総合技術研究所

図 3、4 に NS、EW 方向の地表の観測波、エネルギー、速度の時刻歴を示す。エネルギーの時刻歴をみると E_w は NS、EW 方向でそれぞれ GL-25m では、約 8

(KJ/m^2)、22 (KJ/m^2)、GL-97m では約 16 (KJ/m^2)、32 (KJ/m^2) となっている。従って両方向あわせた E_w は GL-25m で 30 (KJ/m^2)、GL-97m では 48 (KJ/m^2) と算定される。ポートアイランドに比べこの地点では、地表での加速度の大きさが大きかったにもかかわらず、 E_w は小さい値になっている。それは、この地点では液状化といった大きな地盤の破壊が報告されていないことから、 E_w は地盤のひずみ振幅に依存した内部減衰によるものと推察される。また、地表の観測波と比較すると、SH波が卓越していると考えられる 8 から 11 秒付近で E_D の増加率が特に大きくなっている。25 秒付近で多少グラフが凸になっている部分もあるが、15 秒以降は E_D の増加率はほぼ 0 になっている。ただしこの地点では速度時刻歴をみると、15 秒以降も大きな速度が発生し、これにより E_I は増加しており、これは表面波の影響が入ったためと考えられる。

(3) 海南港変電所

図 5、6 に NS、EW 方向の地表の観測波、エネルギー、速度の時刻歴を示す。エネルギーの時刻歴をみると両方向をあわせた E_w は、GL-25m では 0.28 (KJ/m^2)、GL-100m では 0.62 (KJ/m^2) と算定される。速度時刻歴をみると GL-100m は GL-25m に比

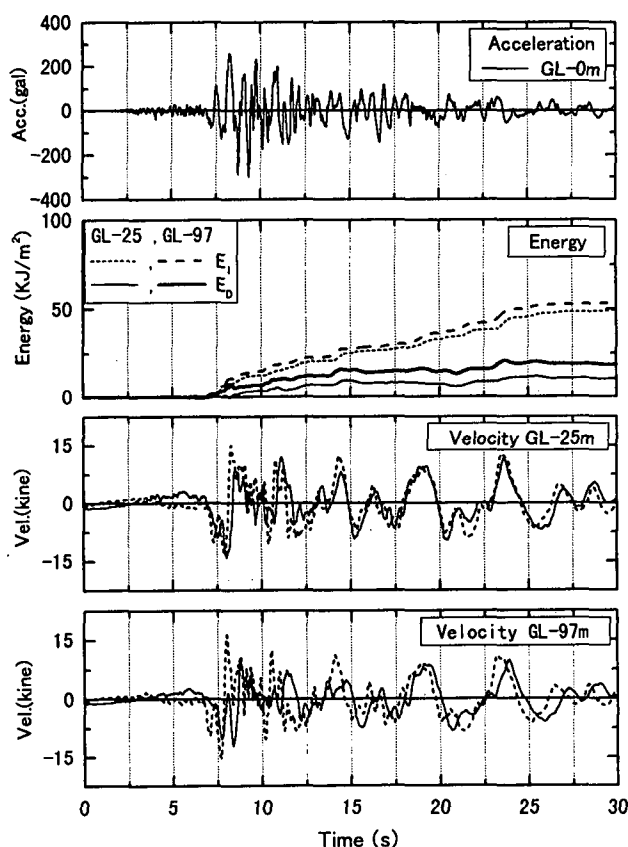


図-3 総合技術研究所 NS 方向の時刻歴

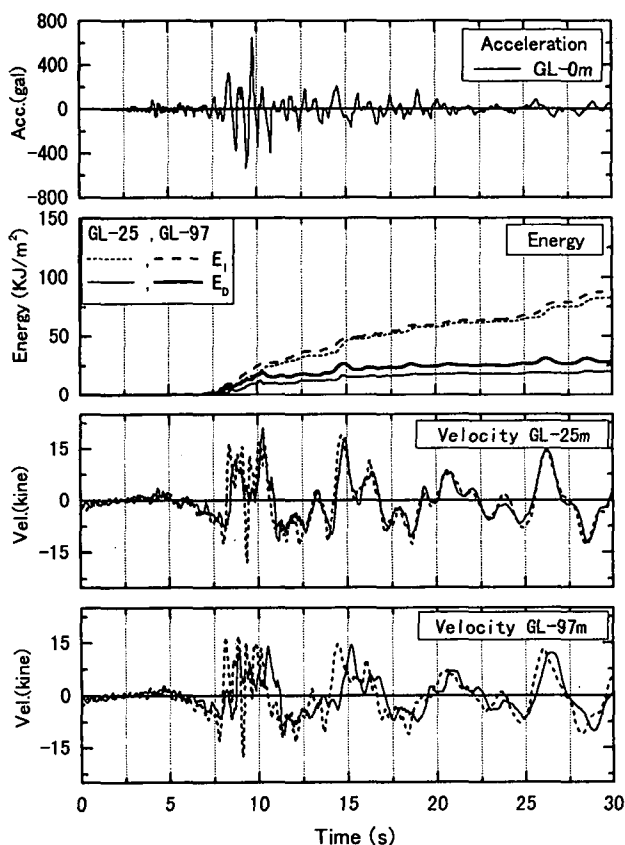


図-4 総合技術研究所 EW 方向の時刻歴

非常に小さい値となっている。これは GL-100m の記録は $V_s = 1630$ (m/s) の硬岩の基盤で観測され、GL-25m との間のインピーダンス比が大きいためと考えられる。一方 2 点間の E_I の差異はわずかで、エネルギー的には増幅していないことが分かる。また、他の地点に比べて地表の加速度が小さいこともあり、 E_w は非常に小さい値になっている。さらにこの地点についても、SH 波が卓越してくると考えられる 8 秒から 17 秒の間で E_D の増加率が大きくなっており、表面波が卓越してくると考えられる 20 秒前後以降では E_D の増加率はほとんどゼロになっているのが分かる。

5. まとめと今後の課題

兵庫県南部地震の際にポートアイランド、総合技術研究所、海南港変電所で観測された本震記録を用い、SH 波の重複反射理論を仮定した波動エネルギーを計算し、地盤内でのエネルギー消費量の評価を試みた。これにより以下のような結果を得た。

- 1) 液状化などの大きな地盤の破壊が起こると、その部分では非常に大きなエネルギーが消費される。
- 2) P 波や表面波が卓越すると考えられる部分ではエネルギー差 (E_D) の増加はほとんど生じず、本

方法により SH 波によるエネルギー消費 (E_w) の評価がほぼ可能と思われる。

3) しかし、いくつかの地点において地震記録の後半部分で重複反射理論を仮定した速度の入射、反射波形が明らかに過大となり、表面波を含む波に対して重複反射理論を適用した誤差が含まれているものと考えられる。

したがって、今後は波形記録から表面波の識別を行い、その影響を分離した分析を進めることが必要である。

謝辞：今回用いた地震データを提供していただいた関西地震協議会に感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 阪神淡路大震災地盤調査研究会(1998):同報告書、7-2 神戸市ポートアイランド鉛直アレー地震観測記録を用いた入射波の分離、pp150-152
- 2) T.Kokusho et al. (1996):Nonlinear dynamic soil properties back-calculated from strong seismic motions during Hyogo-ken Nanbu earthquake, 11th WCEE (Mexico)
- 3) 國生剛治他(1998):兵庫県南部地震のアレー観測における最大コヒーレンス法を用いた地震計設置誤差の評価、pp1107-1108、第33回地盤工学研究発表会

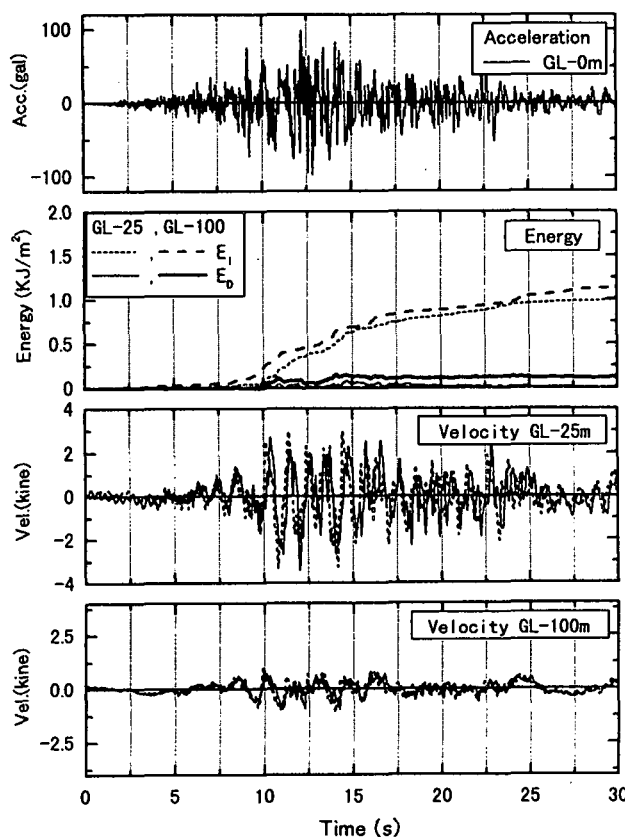


図-5 海南港変電所 NS 方向の時刻歴

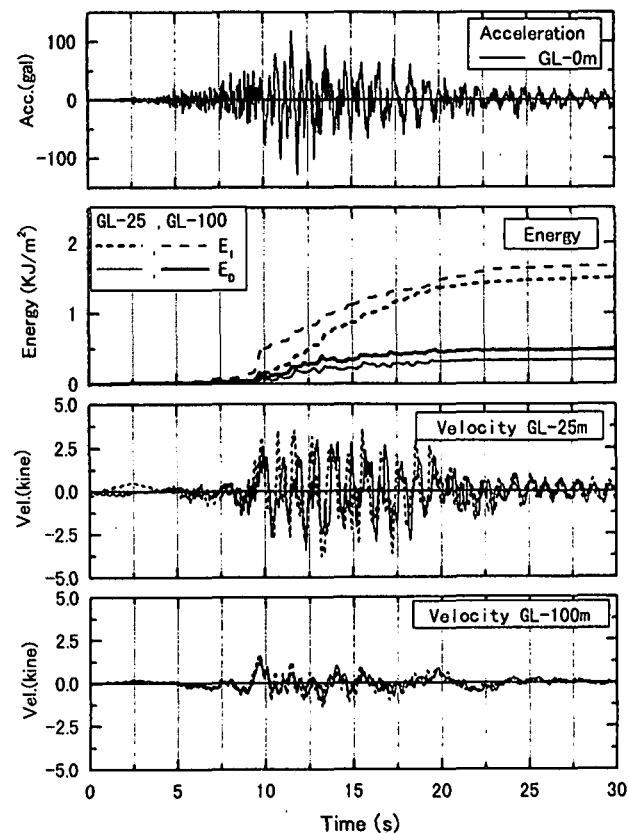


図-6 海南港変電所 EW 方向の時刻歴